

**А. И. ГЕРМАШЕВ, В. А. ЛОГОМИНОВ, Е. Б. КОЗЛОВА, В. А. КРИШТАЛЬ**

## **ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Основной особенностью процесса обработки тонкостенных деталей является прерывистый характер фрезерования, вызванный малыми радиальными и осевыми глубинами резания. Именно это является основополагающим фактором, влияющим на качество поверхности при фрезеровании. Рассмотрены основы формирования профиля обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей. Исследован характер колебательного движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки. Предложена расширенная схема поведения системы в различных скоростных условиях обработки. Показано, как эти особенности связаны с параметрами качества обработанной поверхности. Экспериментально доказано, что при обработке тонкостенных деталей именно вынужденные колебания вносят доминирующий вклад в формирование профиля обработанной поверхности, как в скоростной зоне появления регенеративных автоколебаний, так и при высокоскоростной обработке. Автоколебания способствуют снижению качества обработки в определенном скоростном диапазоне, но их негативное влияние может быть многократно усилено резонансными явлениями. Параметры профиля обработанной поверхности зависят от размаха колебаний точки врезания относительно положения равновесия детали.

**Ключевые слова:** тонкостенная деталь, упругая система, регенеративные автоколебания, высокоскоростная обработка, точка врезания, амплитуда.

**А. І. ГЕРМАШЕВ, В. О. ЛОГОМІНОВ, О. Б. КОЗЛОВА, В. О. КРИШТАЛЬ**

## **ОСНОВЫ ФОРМУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ**

Основною особливістю процесу обробки тонкостінних деталей є переривчастий характер фрезерування, пов'язаний з малими радіальними і осевими глибинами різання. Саме це є основним чинником, що впливає на якість поверхні при фрезеруванні. Розглянуто основи формування профілю обробленої поверхні при фрезеруванні тонкостінних деталей. Досліджено характер коливального руху тонкостінної деталі при різних швидкісних умовах обробки. Запропоновано розширена схема поведінки системи в різних швидкісних умовах обробки. Показано, як ці особливості пов'язані з параметрами якості обробленої поверхні. Експериментально доведено, що при обробці тонкостінних деталей саме вимушені коливання вносять домінуючий внесок в формування профілю обробленої поверхні, як в швидкісній зоні появи регенеративних автоколивань, так і в умовах високошвидкісної обробки. Автоколивання сприяють зниженню якості обробки в певному швидкісному діапазоні, але їх негативний вплив може бути багаторазово посилені резонансними явищами. Параметри профілю обробленої поверхні залежать від розмаху коливань точки врізання щодо положення рівноваги деталі.

**Ключові слова:** тонкостінна деталь, пружна система, регенеративні автоколивання, високошвидкісна обробка, точка врізання, амплітуда.

**A. I. GERMASHEV, V. A. LOGOMINOV, Y. B. KOZLOVA, V. A. KRISHTAL**

## **BASES FOR FORMING THE PROCESSED SURFACE WHEN MILLING THIN-WALL PARTS**

The main feature of the processing of thin-walled details is the intermittent nature of milling, caused by small radial and axial depths. This is the fundamental factor affecting the quality of the surface during milling. The fundamentals of formation of the profile of the machined surface for milling thin-walled parts are considered. The nature of the vibrational motion of a thin-walled component under different high-speed processing conditions is studied. An extended scheme of the system behavior under various high-speed processing conditions is proposed. It is shown how these features are related to the quality parameters of the treated surface. It has been experimentally proved that when processing thin-walled parts of a complex shape, it is the forced oscillations that make the dominant contribution to the formation of the profile of the treated surface, both in the high-speed zone of the appearance of regenerative self-oscillations and in high-speed processing. Self-oscillations contribute to a decrease in the quality of processing in a certain high-speed range, but their negative effect can be repeatedly amplified by resonant phenomena. The parameters of the profile of the treated surface depend on the amplitude of the oscillation of the insertion point relative to the equilibrium position of the workpiece.

**Keywords:** thin-walled part, elastic system, regenerative self-excited oscillation, high-speed processing, point of tooth entrance, amplitude.

**Введение.** Фрезерование тонкостенных деталей является одним из новейших этапов в истории резания металлов [1-2]. Возможности такого метода формообразования поверхности, производительность и эксплуатационные преимущества изготавливаемых деталей, вывели его на одну из лидирующих позиций по популярности среди процессов механической обработки. Использование тонкостенных элементов деталей наиболее широко распространено в авиакосмической отрасли, где одновременно предъявляются как повышенные требования к низкой массе и прочности конструкций, так и к качеству обрабатываемых поверхностей. Изготовление подобных деталей осуществляется путем удаления до 90% припуска заготовки, что диктует острую необходимость в высокой производительности данного процесса [2].

Проблемы, стоящие на пути получения оптимальной геометрической формы и качества поверхности детали, можно разделить на три группы.

Первой, общепринятой в зарубежной и отечественной литературе, является автоколебания (в англоязычной литературе «chatter»), возникающие в процессе резания, и ведущие к периодическому изменению силы резания, положения инструмента и/или детали, существенному ухудшению качества поверхности и повышенному износу инструмента. Для снижения негативного влияния автоколебаний была разработана «регенеративная теория», позволяющая рассчитать границу устойчивости системы при определенной частоте вращения шпинделя. Свое начало подход берет в 50-х годах XX века и основывается на укладке регенеративных волн на поверхности резания. Подавляющее большинство

исследователей склоняется именно к такому способу снижения вибраций при резании.

Ко второй группе можно отнести отклонение обработанной поверхности от номинального профиля (в англоязычной литературе «surface location error»), вызванное недостаточной динамической жесткостью инструмента и/или детали, что приводит к их периодическому отклонению в процессе стабильного резания. Такой подход используется значительно реже, хотя, по мнению авторов, он является более приемлемым для фрезерования тонкостенных сложно-профильных деталей.

В третью группу проблем следует объединить вопросы, связанные с биением инструмента, погрешностью позиционирования, износом инструмента температурными взаимодействиями и т.д.

Если последнюю группу проблем можно устранить высокой культурой производства, то первые две требуют специального исследования и могут быть решены только при условии использования современных достижений науки, реализация которых требует диагностики детали перед каждым технологическим переходом, а также учет особенностей обработки.

Выявление основополагающих факторов, влияющих на качество поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей, требует ясного понимания особенностей процесса обработки, основной из которых является прерывистый характер фрезерования, вызванный малыми радиальными и осевыми глубинами. При высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей процесс происходит в условиях возбуждения упругой системы (УС) детали вынужденными колебаниями, а на малых скоростях на вынужденные накладываются регенеративные автоколебания [3].

**Характер колебательного движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки.** Скоростной диапазон фрезерного станка разделен на две зоны, которые определяют условия фрезерования тонкостенной детали. В данной статье предложена расширенная схема возможного поведения системы в различных скоростных условиях обработки (рис. 1).

При фрезеровании тонкостенных деталей, ввиду прерывистости обработки, важным параметром, который определяет возможность существования автоколебательного процесса, является соотношение времени резания -  $t_{рез}$  и периода автоколебаний детали -  $T_{ак}$ . Если время резания больше периода регенеративных автоколебаний детали, система имеет возможность совершать автоколебания и в зависимости от величины этого соотношения на поверхности резания формируется различное количество волн. При этом качество обработанной поверхности определяется величиной регенеративных автоколебаний -  $R_{ак}$ , так как часть волнистой поверхности, оставленная предыдущим зубом фрезы, остается на поверхности резания и формирует профиль обработанной поверхности (рис. 2).

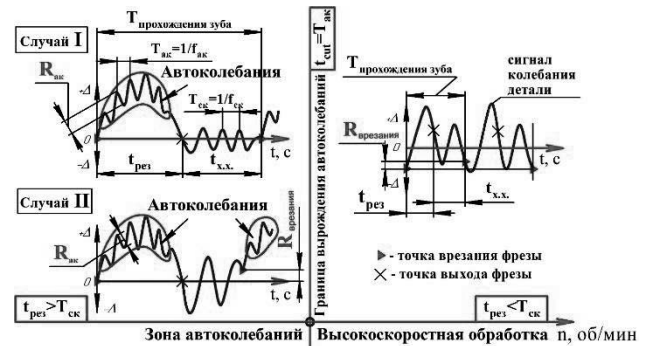


Рис. 1 – Общий вид закона движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки



Рис. 2 – Формирование обработанной поверхности тонкостенной детали в условиях регенеративных автоколебаний

В работе [4] приводится методология оценки уровня регенеративных автоколебаний детали и показано, что величина автоколебаний имеет высокую связь с параметром шероховатости обработанной поверхности (коэффициент парной корреляции для встречного фрезерования составляет 0,94, а для попутного 0,87). Такой анализ применим для случая 1 (рис. 1).

При высокоскоростной обработке тонкостенных деталей, когда время резания -  $t_{рез}$  становится меньше периода автоколебаний детали -  $T_{ак}$  система не имеет возможности совершить даже одного колебательного движения за время одного реза, при этом, наличие волн на поверхности резания не наблюдается. Отсутствует ли автоколебательный процесс или на поверхности резания остается малая фракция волны с точностью сказать, основываясь на имеющихся у авторов экспериментальных данных, нельзя, но можно утверждать, что если незначительная доля волны и существует, то ее недостаточно для возбуждения автоколебаний, способных повлиять на качество обработки.

Таким образом, при относительно высоких скоростях, с точки зрения регенеративных автоколебаний, резание является устойчивым (в англоязычной литературе «stable cutting»). Однако, высокоскоростное фрезерование тонкостенных элементов деталей все равно является одной из сложнейших операций при обработке резанием ввиду возникновения вибраций. Следовательно, первопричиной этого являются не автоколебания.

На рис. 1 показано, что при высокоскоростной обработке тонкостенных деталей процесс резания сменяется свободным движением детали, во время которого деталь совершает свободные затухающие колебания. Ввиду относительно высоких скоростей деталь не успевает прийти в состояние покоя за время

холостого хода и последующее врезание зуба фрезы происходит в колеблющуюся деталь. В этот момент фаза свободных колебаний детали определяет ее расположение относительно положения равновесия. Таким образом, снятие припуска может осуществляться при различных положениях детали, и оно может многократно изменяться в течение обработки.

Так как положение инструмента ввиду высокой жесткости является неизменным в направлении колебательного движения детали, то в зависимости от ее отклонения в момент врезания зуба фрезы может происходить как уменьшение, так и увеличение фактической радиальной глубины  $a_e$  (рис. 3). При этом наблюдается, соответственно, недостаточное удаление припуска или же зарез детали. Как уже было отмечено, положение детали в момент начала резания может многократно изменяться в течение обработки, что приводит к появлению волн на поверхности и существенному ухудшению ее качества (рис. 4).

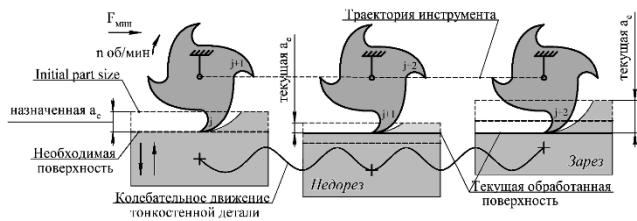


Рис. 3 – Формирование обработанной поверхности тонкостенной детали при высокоскоростной обработке

Методика экспериментального определения условий обработки при высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей будет описана в дальнейших работах авторов. Основой методики является оценка величины отклонения точки врезания относительно положения равновесия детали –  $R_{\text{врезания}}$ . Результаты экспериментальных исследований показывают, что положение детали в момент начала резания определяет шероховатость обработанной поверхности.

При обработке тонкостенных элементов деталей для обеспечения высокой производительности стремятся к использованию фрез с максимально возможным количеством зубьев. Чем больше количество зубьев, тем меньше время холостого хода. В связи с этим, существуют и достаточно распространены, такие условия обработки, когда скорость резания не велика, фрезерование происходит в условиях возникновения регенеративных автоколебаний и деталь не успевает прийти в состояние покоя перед врезанием. Такая ситуация изображена на рис. 1 (случай 2). Тогда, на закономерности, установленные для обработки с автоколебаниями, накладываются особенности, характерные для высокоскоростной зоны, то есть, качество обработанной поверхности зависит не только от параметров автоколебаний, но и от отклонения точки врезания относительно положения равновесия детали.

**Экспериментальный стенд и условия проведения исследований.** Для изучения процесса

фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей предложен стенд, изображенный на рис. 4. Детальная информация по стенду изложена в работах [5, 6]. Захватное устройство представляет собой массивное основание, которое устанавливается на столе фрезерного станка и служит для надежного крепления упругого элемента (тонкостенной пластины). На пластине жестко закрепляется обрабатываемый образец. При фрезеровании, в результате действия силы отжима, происходит перемещение образца, величину которого измеряют датчиком по изменению зазора  $\Delta$ .

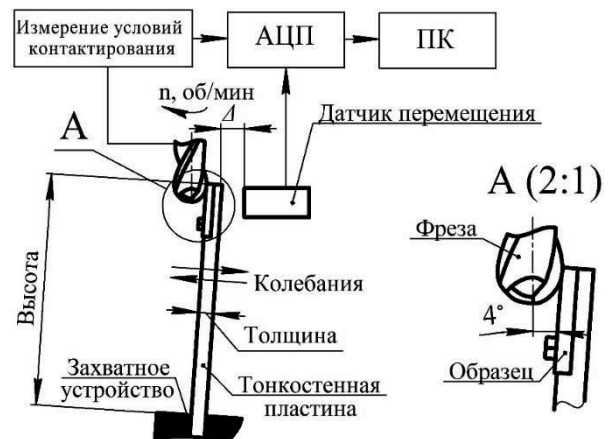


Рис. 4 – Стенд для проведения экспериментальных исследований

Конструкция стенда была доработана системой измерения условий контактирования инструмента с деталью [7, 8]. К измерительному стенду подводится низковольтный источник питания. При контакте зуба фрезы с обрабатываемым образцом электрический сигнал передается через подвижный токосъемник на АЦП. Запись сигнала с токосъемника и сигнала перемещения образца осуществляется одновременно, что дает возможность их высокоточного совмещения.

Система измерения наличия контакта между фрезой и инструментом является принципиальным элементом экспериментального стенда для изучения процесса прерывистого резания, так как позволяет разделять осциллограмму колебания детали на процесс резания и холостой ход.

Экспериментальные исследования проводили на фрезерном станке с ЧПУ Higon CX10. В качестве упругого элемента была использована консольно-защемленная пластина (материал Ст65Г) толщиной  $h = 8$  мм и шириной  $b = 60$  мм, вылет пластины составлял 80 мм. На свободном конце пластины был жестко закреплён образец (материал Ст3), который обрабатывался твердосплавной концевой сферической 6-и зубой фрезой (угол наклона винтовой режущей кромки  $w = 30^\circ$ ). Величина наклона оси инструмента относительно заготовки -  $4^\circ$ . Частота собственных колебаний УС тонкостенной детали составляла  $f_{\text{ск}} = 725$  Гц, коэффициент демпфирования  $\xi = 0,03$ , жесткость  $C = 2400$  Н/мм.

Во всех экспериментах осевая глубина резания

составляла  $a_p = 1$  мм, радиальная глубина  $a_e = 0,5$  мм, подача на зуб  $S_z = 0,05$  мм/зуб, направление подачи – попутное. Смазывающе-охлаждающая технологическая среда не применялась.

**Результаты экспериментальных исследований, дискуссия.** Для верификации вышеописанной информации была проведена одна серия экспериментов с замером динамики фрезерования в скоростном диапазоне от  $n = 500$  об/мин до  $n = 10000$  об/мин. Шаг изменения частоты вращения шпинделя составлял 100 об/мин. После фрезерования было выполнено профилографирование обработанной поверхности и замер параметра шероховатости  $R_a$ . Анализируемым параметром процесса обработки являлся размах колебания точки врезания относительно положения равновесия детали –  $R_{\text{врезания}}$ . На рис. 5 показано, каким образом изменяется данный параметр в зависимости от частоты вращения шпинделя  $n$  и характерные условия возникновения максимальных значений.

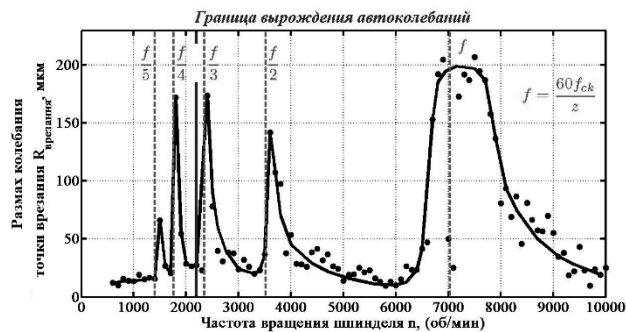


Рис. 5 – Размах колебаний точки врезания при различных скоростных условиях обработки

Наибольший размах точки врезания наблюдали при частоте возбуждения системы равной частоте собственных колебаний, а также в два, три, четыре и пять раз меньше нее. Это явления вызвано условием резонанса и связано с возбуждением системы с зубцовой частотой или ее высшими гармониками, которыми насыщен частотный спектр прерывистого фрезерования. Такое поведение УС тонкостенной детали является закономерным в условиях прерывистого резания и более детально будет описано в дальнейших работах авторов.

Именно размах колебания точки врезания относительно положения равновесия детали –  $R_{\text{врезания}}$  определяет качество обработки, и чем меньше это значение, тем ниже параметр шероховатости  $R_a$ . При виброустойчивом режиме обработки, когда достигнуто наименьшее значение размаха точки врезания, качество поверхности ограничивается точностью изготовления и позиционирования инструмента.

На рис. 6 на примере фрагмента осциллограммы колебания детали показано, как изменяется положение точки врезания и каким образом это отражается на качестве обработанной поверхности.

Всплески размаха точки врезания можно также наблюдать и в зоне появления автоколебаний (рис. 5),

то есть, резонансные явления имеют место и в этой скоростной зоне

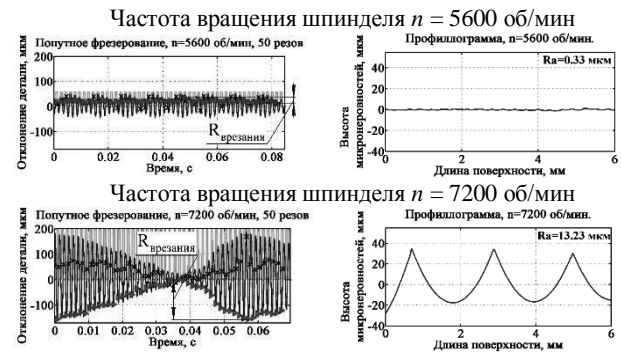


Рис. 6 – Внешний вид обработанной поверхности при различном месторасположении точки врезания (высокоскоростная обработка)

Использование многозубого инструмента способствует увеличению частоты возбуждения системы пропорционально количеству зубьев фрезы, при этом, скорость резания остается неизменной. То есть, процессы возбуждения автоколебаний протекают аналогично вне зависимости от количества зубьев, а возбуждение системы происходит низшей гармоникой при большем числе зубьев фрезы. При этом, чем ниже гармоника, тем выше ее амплитуда, а соответственно и амплитуда колебания детали.

На практике сокращение времени холостого хода обеспечивает относительно высокие колебания при начале срезания припуска последующим зубом фрезы. А при резонансных явлениях, амплитуды колебания детали дополнительно усиливаются. Таким образом, в процесс формирования поверхности свой вклад вносит местоположение точки врезания. А так как обработка происходит в зоне автоколебаний, то и их параметры существенно влияют на формообразование обработанной поверхности.

На рис. 7 приведены фрагменты колебательного движения детали в условиях возбуждения автоколебаний и профилограммы обработанной поверхности.

Рассматриваемые поверхности характеризуются низким качеством обработки, вызванным автоколебаниями. Однако, при режимах фрезерования, где величина точки врезания относительно низка ( $n = 1100$  об/мин,  $n = 2000$  об/мин), профиль характеризуется малыми неровностями, которые сформированы исключительно автоколебаниями. При этом, в условиях фрезерования, где наблюдали пиковые значения размаха колебаний точки врезания ( $n = 1500$  об/мин,  $n = 1800$  об/мин), шероховатость поверхности существенно выше и характеризуется периодическими волнами высокой амплитуды. Это свидетельствует о различной радиальной глубине фрезерования, вызванной нестабильностью положения детали в момент начала резания зубом фрезы. То есть, микронеровности малой частоты и высокой амплитуды вызваны размахом точки врезания, а высокой частоты и малой амплитуды – автоколебаниями.

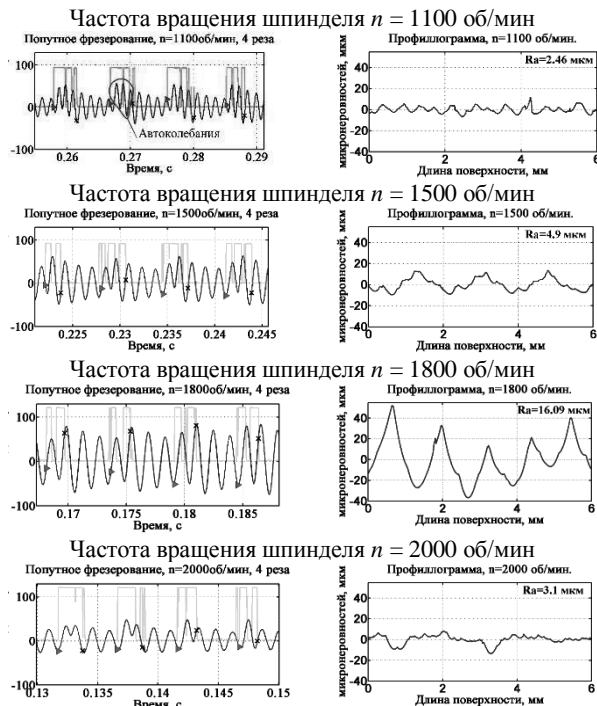


Рис. 7 – Внешний вид обработанной поверхности при различном месторасположении точки врезания (зона автоколебаний)

**Выводы.** При фрезеровании тонкостенных элементов деталей скоростной диапазон фрезерного станка с точки зрения возбуждения автоколебаний можно разделить на две зоны. Первая зона – низкоскоростная. В ней проходит обработка, когда время резания больше периода автоколебаний. При этом на поверхности резания можно наблюдать появление регенеративных волн. Вторая – зона высокоскоростной обработки. В ней время резания меньше периода автоколебаний и деталь не имеет возможности их совершать.

Расположение границы вырождения автоколебаний зависит от множества факторов, среди которых можно выделить режимы резания и ЧСК УС тонкостенной детали. Расчет этого параметра приведен в работе [9]. Как в зоне появления автоколебаний, так и в высокоскоростной зоне возбуждение системы всегда происходит в условиях вынужденных колебаний, связанных с прерывистостью процесса обработки.

В зоне появления автоколебаний формообразование обработанной поверхности определяется либо исключительно параметрами автоколебаний, либо, в случае использования многозубого инструмента и повышения зубцовых частот, совокупностью факторов, обусловленных величиной автоколебаний и положением детали в момент начала врезания очередного зуба фрезы. Причем, положение детали имеет определяющее значение. Учитывая факт использования фрез с большим количеством зубьев в условиях производства, последний вариант является более распространенным.

При высокоскоростном фрезеровании

формирование профиля обработки зависит от размаха колебаний точки врезания относительно положения равновесия детали. Существенное увеличение данного параметра наблюдается при резонансных явлениях, когда частота возбуждения упругой системы тонкостенной детали или ее высшие гармоники равны частоте собственных колебаний детали.

При использовании многозубых фрез при обработке тонкостенных деталей именно вынужденные колебания вносят доминирующий вклад в формирование профиля обработанной поверхности, как в скоростной зоне появления регенеративных автоколебаний, так и при высокоскоростной обработке. При этом параметром, характеризующим состояние системы, является изменение положения детали в момент начала резания зубом фрезы. Стоит отметить, что автоколебания, безусловно, способствуют снижению качества обработки в определенном скоростном диапазоне, но их негативное влияние может быть многократно усилено резонансными явлениями.

#### Список литературы

1. Добротворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков. Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»*, 2016. №72. С. 105–111.
2. Добротворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.М. Технологическое обеспечение высокоскоростного фрезерования деталей с неравномерной жесткостью при управлении величиной припуска. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017) : матеріали тез доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 24–27 квіт. 2017 р.) : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]*. – Чернігів ЧНТУ, 2017. Т. 1. С. 102-103
3. Внуков Ю. Н., Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Зубарев А. Е. Методология экспериментального исследования закона движения (вибраций) тонкостенной детали при концевом фрезеровании. *Вестник МГТУ «Станкин»*. Москва. МГТУ, 2015. № 3 (34). С. 15–23.
4. Внуков Ю. Н., Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Каморкин П. А. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2015. № 10. С. 3–13.
5. Стенд для дослідження коливальних при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей: пат. 94974 Україна: МПК (2006) G01N1/00; G01M7/02. № 201405981; заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. 4 с.
6. Внуков Ю. Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2011. № 80. С. 32–37.
7. Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Внуков Ю. Н. Устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей. *Инженерия поверхности и реновация изделий : тезисы доклада XV Международной научно-технической конференции (г. Затока, 01–05 июня 2015 г.)*. Киев, 2015. С. 45–47.
8. Внуков Ю. Н. Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2015. № 85. С. 48–55.
9. Vnukov Y. N., Germashev A. I., Logominov V. A., Krishtal V. A. Possibilities of using stability lobe diagram for stability prediction of

high speed milling of thin-walled details. *Mechanics and Advanced Technologies*. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2017. Vol. 79. pp. 41–48.

#### References (transliterated)

1. Dobrotvorskiy S., Basova Ye., Kononenko S. Uovershenstvovanie tekhnologii frezerovaniya detalej s neravnomernoj zhestkost'yu [Improving the technology of milling parts with uneven rigidity] *Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. tr.* [Open information and computer integrated technologies: a collection of scientific papers]. Kharkov, 2016, No 72, pp.105–111.
2. Dobrotvorskiy S., Basova Ye., Kononenko S. [Technological support of high-speed milling of parts with uneven low rigidity when controlling the size of the allowance] *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system (KZLaTPS – 2017) : materialy tez dopovidei VII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Ch 1 (m. Chernihiv , 24–27 kvit. 2017 r.)* [Comprehensive assurance of the quality of technological processes and systems (KJYPPS - 2017): materials of abstracts of the VII international scientific and practical conference (Chernihiv, April 24–27, 2017).] Chernihiv, Chernihiv National Technological University Publ., 2017, pp. 102–103.
3. Vnukov Ju. N., Germashev A. I., Dyadya S. I., Zubarev A. E. Metodologiya jeksperimental'nogo issledovaniya zakona dvizheniya (vibracij) tonkostennoj detali pri koncevom frezerovanii [Methodology of experimental research of law of motion (vibrations) of the thin-walled detail at the end-capping milling]. *Vestnik MGTU "Stankin"* [Vestnik MGTU "Stankin"]. Moscow, MGTU Publ., 2015, no 3 (34), pp. 15–23.
4. Vnukov Ju. N., Germashev A. I., Djadya S. I., Kamorkin P. A. Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebanij tonkostennoj detali pri ee koncevom frezerovanii [Development of methodology of estimation of level of self-excited oscillations of the thin-walled detail at her end-capping milling]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 10, pp. 3–13.
5. Logominov V. O., Germeshev A. I., Dyad S. I., Kozlova O. B. *Ctend dlja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detale* [Casing for study of oscillations in finite cylindrical milling of thin-walled elements of parts]. Patent UA, no. 94974, 2006.
6. Vnukov Ju. N. Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkih detalej koncevymi frezami [Stand for the study of mechanical oscillations in the milling of ladder parts at the end milling]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, no. 80. pp. 32–37.
7. Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova Y. B., Vnukov Yu. N. Ustrojstvo dlja issledovaniya uslovij kontaktirovaniya instrumenta s detal'ju pri cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh detalej [Device for studying the conditions of contacting the tool with a workpiece for cylindrical milling of thin-walled parts] *Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij : tezisy doklada XV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii (01-05 ijunja 2015 r., Zatoka)* [Surface Engineering and Renovation of Products. Abstracts of the report of the XV Int. Sci. and Tech. Conf. (01-05 June 2015, Zatoka)]. Kiev Publ., 2015, pp. 45–47.
8. Vnukov Yu. N., Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova Y. B. Metodika opredelenija uslovij kontaktirovaniya instrumenta s tonkostennoj detal'ju pri ee koncevom frezerovanii [Method for determining the conditions for contacting the tool with a thin-walled part at its end milling]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 85. pp. 48–55.
9. Vnukov, Y. N., Germashev, A. I., Logominov, V. A., Krishtal, V. A. (2017), "Possibilities of using stability lobe diagram for stability prediction of high speed milling of thin-walled details", *Mechanics and Advanced Technologies. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*, vol. 79. pp. 41–48.

Поступила (received) 12.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гермашев Антон Ігоревич (Гермашев Антон Игоревич, Germashev Anton Igorevich)** – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, старший науковий співробітник, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7385-1664>; e-mail: [germashevanton@mail.ru](mailto:germashevanton@mail.ru).

**Логомінов Віктор Олексійович (Логоминов Виктор Алексеевич, Logominov Victor Alekseevich)** – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8148-266X>; e-mail: [logominov@rambler.ru](mailto:logominov@rambler.ru).

**Козлова Олена Борисівна (Козлова Елена Борисовна, Kozlova Yelena Borisovna)** – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5913>; e-mail: [kozlova@zntu.edu.ua](mailto:kozlova@zntu.edu.ua).

**Кришталь Володимир Олександрович (Кришталь Владимир Александрович, Krishtal Vladimir Alexandrovich)** – Державне підприємство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро Прогрес» імені академіка О. Г. Івченка, начальник цеху, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5609-8137>; e-mail: [khristalvladimir@gmail.com](mailto:khristalvladimir@gmail.com).